

ANÁLISIS DE LA RELACIÓN ENTRE LLUVIA SIMULADA Y FORMACIÓN DE COSTRA, Y SUS EFECTOS SOBRE LOS PARÁMETROS DE INFILTRACIÓN EN CUATRO SUELOS MEDITERRÁNEOS

M. Angulo-Martínez^{1*}, J. Alastrué¹, D. Moret-Fernández¹, S. Beguería¹,
M.V. López¹, A. Navas¹, C. González-Cebollada²

¹ Dept. of Soil and Water, Estación Experimental de Aula Dei–Consejo Superior de Investigaciones Científicas (EEAD–CSIC). 1005 Avda. Montañana, 50080–Zaragoza (Spain),
marta.angulo@eead.csic.es.

² Departamento de Ciencia y Tecnología de Materiales y Fluidos.
Escuela Politécnica Superior. Universidad de Zaragoza

RESUMEN. Este artículo estudia el efecto de episodios de lluvia simulada sobre la formación de la costra superficial y sus parámetros hidráulicos en cuatro tipos de suelos mediterráneos. Para ello se realizaron 3 simulaciones con diferentes intensidades de lluvia, monitorizando a tiempo real mediante disdrómetro óptico las características de las gotas. Una vez formada la costra superficial se cuantificó, sobre suelo seco y para cada tipo de suelo e intensidad de lluvia, la resistencia a la penetración y las propiedades hidráulicas de la costra por infiltrometría de disco. Los resultados muestran que la intensidad de la lluvia simulada afectó de forma diferente, según tipo de suelo, a la resistencia a la penetración y las propiedades hidráulicas de la

costra. El tamaño de gota e intensidad de la lluvia se relaciona inversamente y directamente con la conductividad hidráulica y la sorptividad, respectivamente, con variaciones de pendiente por tipo de suelo.

ABSTRACT. The objective of this article is to study the effect of simulated rainfall episodes of different intensity on soil crust formation and how such soil crust affects the hydraulic parameters in four types of Mediterranean soils. For this, three simulations were carried out with different rainfall intensities, monitoring the rainfall characteristics in real time by an optical disdrometer. Once the surface crust was formed, the resistance to penetration and

the hydraulic properties of the crust were quantified on dry soil and for each type of soil and rainfall intensity by disk infiltrometry. The results show that the intensity of the simulated rain affected, according to the type of soil, the resistance to penetration and the hydraulic properties of the crust. Drop size and rainfall intensity are inversely and directly related to hydraulic conductivity and sorptivity, respectively, with slope variations by soil type.

1. INTRODUCCIÓN

La formación de la costra superficial del suelo es un proceso común y generalizado en suelos áridos y semiáridos que afecta a la escorrentía y a los rendimientos del cultivo. Estas regiones constituyen un tercio de la superficie mundial, albergando a unos 700 millones de habitantes. La presencia de costras edáficas disminuye la conductividad hidráulica y por consiguiente la velocidad de infiltración, lo cual conlleva una reducción del agua disponible para los cultivos. Asimismo, las costras favorecen la escorrentía superficial, especialmente en pendientes, y con ello la acción erosiva de la misma, a la vez que provocan encharcamientos en zonas llanas, donde se producirá una costra de mayor espesor. La existencia de costras edáficas, dependiendo de su espesor, dificulta, además, la germinación de las plantas (FAO, 1993). Las costras edáficas se producen por la acción de la precipitación natural o artificial (sistemas de riego por aspersión). El impacto de las gotas sobre la superficie del suelo desnudo desagrega las partículas (Hudson, 1995) produciendo una compactación y la

formación de una costra superficial por cambios en la estructura en los primeros milímetros del suelo (Morin et al., 1981). Asimismo, los eventos de precipitación desencadenan procesos de slaking, que supone una rotura de los agregados del suelo por la explosión de los agregados cuando éstos se humectan rápidamente. El resultado de ambos procesos es la existencia de una capa superficial de varios milímetros de espesor, con una elevada densidad aparente y propiedades físico-químicas diferentes del material subyacente, que afecta a las propiedades hidráulicas del suelo. El presente estudio aborda el estudio de la formación de la costra edáfica en cuatro tipos de suelos a partir de eventos de lluvia simulada, para determinar la influencia de la misma en los parámetros hidráulicos.

2. METODOLOGÍA

El estudio se llevó a cabo en parcelas experimentales situadas en la Estación Experimental de Aula Dei EEAD-CSIC, ubicada en el centro del valle del Ebro, al NE de la península Ibérica (41°43'30"N, 0°48'39"O, 230 m.s.n.m.). La zona se clasifica climáticamente como clima semiárido continental frío (BSk, Köpen), en la que las precipitaciones medias anuales ascienden a unos 330 mm, siendo localmente intensas.

Los ensayos de simulación de lluvia se llevaron a cabo sobre cuatro suelos (2 parcelas por tipo suelo, las dimensiones de cada parcela son: 14 m. largo × 1 m. ancho y profundidad de 0.8 m), procedentes de suelos naturales correspondientes a un Cambisol, Gypsisol, Solonchak y Solonetz. La tabla 1 muestra una descrip-

ción completa de las características de los suelos.

Tabla 1. Características suelos.

Parámetro	Cambisol	Gypsisol	Solonchak	Solonetz
<i>Salinidad (CE)</i>				
<i>Extr. Sat (dS/m)</i>	1.12	2.84	2.18	0.20
<i>Cation soluble</i>	Ca	Ca	Ca	-
<i>CIC (meqL⁻¹)</i>	149.40	119.88	155.99	146.85
<i>pH</i>	8.63	8.35	8.13	9.63
<i>Arena (%)</i>	29.23	43.70	19.60	21.07
<i>Limo (%)</i>	53.43	47.00	61.95	59.47
<i>Arcilla (%)</i>	17.33	9.30	18.45	19.47
<i>Carbono (%)</i>	1.02	0.49	1.03	0.52
<i>Materia org (%)</i>	1.73	0.84	1.78	0.85
<i>Nitrógeno (%)</i>	0.11	0.07	0.06	0.02
<i>C/N</i>	9.19	7.54	17.76	26.00
<i>CO₃⁻ (%)</i>	35.41	15.72	35.70	32.99
<i>Yesos (%)</i>	2.50	61.79	3.81	1.20
<i>Dens. real (g/cm³)</i>	2.52	2.01	2.52	2.53
<i>Dens. ap. (g/cm³)</i>	1.31	1.18	1.31	1.59
<i>Porosidad (%)</i>	47.88	41.26	47.94	34.52

Los suelos desnudos fueron labrados con un rotocultor a una profundidad de 15 cm. Previo a la aplicación de lluvia simulada se efectuó un análisis de distribución de agregados. El estado de humedad y resistencia a la penetración fue medido justo antes de realizar las simulaciones de lluvia, con el fin de establecer relaciones con las condiciones posteriores. Las medidas se efectuaron con sonda capacitiva Delta-T SM200 y penetrómetro de bolsillo geotester, utilizando una punta de 6.4 mm de diámetro de sección plana, para humedad y resistencia a la penetración, respectivamente, tomando un total de 9 repeticiones por área de muestreo.

2.1. Simulación de lluvia

Los eventos de precipitación se realizaron con un simulador de lluvia, consistente en una motobomba con depósito de 60 L (Fig. 1, Tabla 2) que incorpora una válvula más manómetro que permite regular la presión del agua, y con ello la intensidad de la lluvia simulada.

Tabla 2. Características del simulador de lluvia (Arnáez et al., 2007).

<i>Altura caída (m)</i>	2.2
<i>Boquilla</i>	Lechler 460.608.17
<i>Ángulo de rociado</i>	120°
<i>Orificio de salida (mm)</i>	1.4
<i>CU (%)</i>	96.5
<i>Fuente de agua</i>	Bomba de presión accionada por motor de gasolina



Fig. 1. Simulación de lluvia en parcelas con distintos tipos de suelos.

En cada tipo de suelo se realizaron 3 intensidades de simulación de lluvia, manteniendo la presión constante a 1, 1.6 y 2.2 bares, durante 15 minutos cada una. Se realizaron 3 repeticiones por cada tipo de simulación de lluvia, lo que significa

un total de 36 experimentos. Las características pluviométricas de cada simulación se monitorizaron a tiempo real con un disdrómetro óptico LPM de Thies Clima, Inc. Este sensor consta de dos cabezales, emisor y receptor, de un haz de luz láser infrarroja. La atenuación de la señal láser por el paso de las gotas permite calcular el diámetro y la velocidad de las mismas. A partir de esta información se obtienen variables integradas tales como la intensidad y cantidad de lluvia, la energía cinética, el número de partículas y los quintiles de la distribución de tamaños y velocidades de las gotas.

El disdrómetro óptico se situó bajo la boquilla del simulador, a 40 cm sobre la superficie del suelo. En la misma área se emplazó un cilindro de 35 cm de diámetro, insertado 2 cm en el suelo, que delimitó la zona de muestreo en la superficie del suelo. Tras las simulaciones de lluvia, ya con suelo seco, se realizaron medidas de resistencia a la penetración de la costra e infiltración.

2.2. Determinación parámetros hidráulicos

Las medidas de infiltración se realizaron utilizando la técnica de infiltrometría de disco, empleando una base de 10 cm de diámetro. Las medidas de caída del nivel del agua en el depósito se automatizaron con un sistema de transductor diferencial de presión conectado a un datalogger (Casey y Derby, 2002). Se utilizó una capa de arena de contacto para facilitar el contacto entre la base del infiltómetro y la superficie del suelo, y se tomaron datos de humedad inicial y saturada de la costra superficial. Las medidas de infiltración se

efectuaron a una tensión de 0 cm durante 10-15 min. Las propiedades hidráulicas, sorptividad (S) y conductividad hidráulica (K), se calcularon a partir del análisis inverso de la curva de infiltración acumulada utilizando el modelo de Haverkamp et al., (1994) (Latorre y Moret-Fernández, 2015).

2.3. Análisis relación lluvia-costra-infiltración

Para cuantificar el efecto de la precipitación sobre la formación de costra en los distintos suelos, se empleó un modelo lineal de efectos mixtos (LME). El uso de este tipo de modelos permite entender el patrón de cada variable relativa a cada episodio de lluvia simulada, tales como: intensidad, energía cinética, número de gotas, diámetro y velocidad media de las gotas y sus correspondientes percentiles, cuantificando para cada simulación la variabilidad que se da entre las réplicas y por tipo de suelo. Al mismo tiempo, el modelo evalúa, a través del test de Tukey, si las variables comentadas son significativamente diferentes entre cada episodio de simulación. El modelo LME combina una regresión lineal junto con el análisis de varianza de los efectos aleatorios.

En segundo lugar, se analizó la relación conjunta entre lluvia, costra y parámetros hidráulicos por tipo de suelo, mediante un modelo lineal. El modelo de regresión lineal, para cada variable dependiente, tales como la variación en resistencia a la penetración (ΔP), y los parámetros hidráulicos S y K , por simulación y réplica, modeliza la relación entre la variación de los parámetros de cada variable dependiente, con las variables características de la lluvia simulada, tales como intensidad, diámetro mediano (D_{50}), número de partículas o

energía cinética, por tipo de suelo. Con el fin de determinar que variable o conjunto de variables de la lluvia simulada explican mejor los cambios en cada tipo de suelo en relación a la costra edáfica.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como consecuencia del mismo tipo de labor realizada en todos los suelos, el estudio de distribución de agregados en seco reveló que las condiciones iniciales de tamaño de agregados fueron similares en todos los suelos. Por lo tanto, las diferencias en cuanto a formación de costra por tipo de suelo y su influencia en S y K resultaron del efecto combinado de la acción de la lluvia simulada junto con las características físico-químicas de los suelos.

3.1. Caracterización de la lluvia simulada

El análisis de las características de la lluvia simulada por simulación mediante el modelo LME y test de Tukey resultó en una diferencia significativa entre la primera simulación y las demás, pero entre la segunda y la tercera, realizadas a presiones superiores de 1.5 bares, no se encontraron diferencias significativas en las variables integradas analizadas (intensidad, cantidad de agua acumulada y energía cinética). Este resultado indica que el motor del simulador que accionaba el bombeo de agua, no permitía mantener una presión constante, de manera que a partir de 1.5 bares se obtuvieron escasas diferencias independientemente de la presión aplicada. Las características medias de la lluvia simulada se muestran en la tabla 3.

Se detectó un mayor número de partículas a menor presión (Fig. 2). Esto es

debido al tipo de boquilla empleada en las simulaciones, capaz de distribuir el agua en un ángulo de 120° . A mayor presión una mayor parte del agua salía proyectada por los bordes del ángulo hacia el plástico que aislaba el área de la simulación. Como consecuencia, el agua se canalizaba por el plástico y la zona central de medición registraba menos partículas.

Tabla 3. Características medias lluvia simulada.

Parámetro	Simulación 1 (1 bar)	Simulación 2 (1.6 bar)	Simulación 3 (2.2 bar)
<i>Intensidad (mm/h)</i>	26.45	40.50	41.14
<i>Lluvia (mm)</i>	6.61	10.13	10.28
<i>Ke ($J m^{-2} mm^{-1}$)</i>	1.08	0.51	0.57
<i>Nº gotas</i>	22409	18754	18154
<i>Dmedio (mm)</i>	0.46	0.55	0.57
<i>Vmedia ($m s^{-1}$)</i>	1.21	1.21	1.21
<i>D10 (mm)</i>	0.20	0.24	0.25
<i>D50 (mm)</i>	0.43	0.54	0.56
<i>D90 (mm)</i>	0.73	0.88	0.9
<i>V10 ($m s^{-1}$)</i>	0.36	0.28	0.27
<i>V50 ($m s^{-1}$)</i>	1.01	0.94	0.92
<i>V90 ($m s^{-1}$)</i>	2.31	2.53	2.57

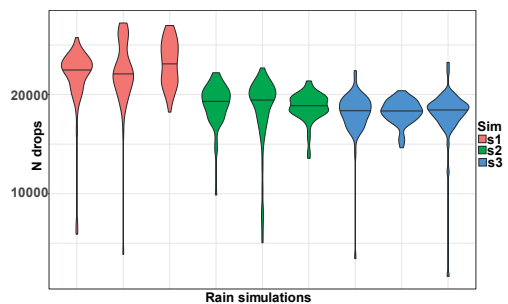


Fig. 2. Diagramas de violín del número de gotas por simulación y réplica. Cada color muestra la simulación. La línea horizontal en los diagramas representa el valor de la mediana.

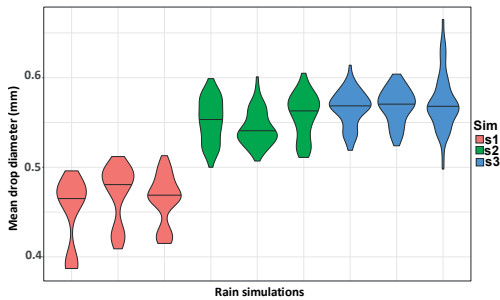


Fig. 3. Diagramas de violín representando el diámetro medio (mm) por simulación y réplica. Cada color muestra la simulación. La línea horizontal en los diagramas representa el valor de la mediana.

A pesar de las incidencias detectadas, el tamaño de las gotas aumentó con la presión (Fig. 3) lo cual permitió estudiar la relación entre el tamaño de las partículas de las lluvias simuladas y la costra edáfica producida en cada tipo de suelo.

3.2.- Análisis costra edáfica

De los cuatro suelos analizados la mayor variación a la resistencia a la penetración en relación con las características de la lluvia simulada se produjo en el Gypsisol y el Cambisol. El Solonchack y el Solonetz presentaron valores similares en cuanto a la variación de la resistencia a la penetración. Los resultados del modelo de regresión muestran que el incremento en el tamaño de las gotas por simulación es el mayor responsable del desarrollo de la costra, posiblemente debido a procesos de splash o impacto de las gotas y en segundo término slaking, (Fig. 4). Debido a que la resistencia del suelo a la penetración guarda relación con la densidad aparente y proporciona una medida indirecta de la

degradación física de los suelos y del espesor de la costra edáfica (López, 1993), los resultados sugieren una relación directa entre el tamaño de gota y el aumento de la densidad aparente o la compactación de la costra.

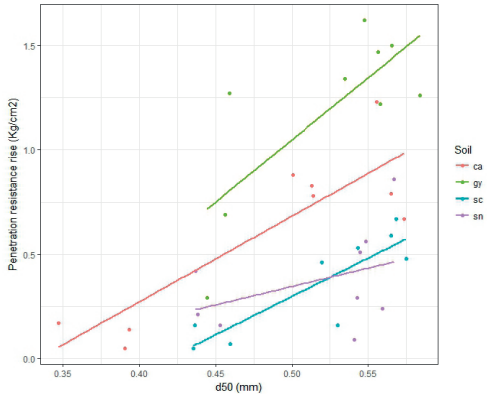


Fig. 4. Variación de la resistencia a la penetración en relación con el incremento en el tamaño mediano (D50, mm) de las gotas por simulación y tipo de suelo.

Atendiendo a estos resultados, conociendo el diámetro mediano de un evento de precipitación o de riego por aspersión es posible estimar en los tipos de suelo analizados la variación de la resistencia a la penetración y como consecuencia el grosor de la costra (Tabla 4).

Tabla 4. Ecuaciones para el cálculo de la variación de la penetración por tipo de suelo.

Tipo de suelo	Ecuación
<i>Cambisol</i>	$\Delta pen = 2.72x \text{ d50}$
<i>Gypsisol</i>	$\Delta pen = 3.51x \text{ d50}$
<i>Solonchak</i>	$\Delta pen = 1.96x \text{ d50}$
<i>Solonetz</i>	$\Delta pen = 1.98x \text{ d50}$

3.3. Análisis de los parámetros hidráulicos

Los resultados muestran un comportamiento diferente entre los valores de los parámetros hidráulicos, el tipo de suelo y la intensidad de la lluvia. Los suelos con costras con mayor resistencia a la penetración, obtenidas en las simulaciones de lluvia a 2.2 bares, presentan excepto para el Gypsisoil, valores más bajos de conductividad hidráulica (K) (Fig. 5). Esto es debido a que durante los procesos de splash y slaking, las partículas más pequeñas procedentes de la rotura de los agregados obturaron los macroporos del suelo, reduciendo la permeabilidad del mismo. Los suelos Solonchak y Solonetz presentaron las mayores variaciones de K en función de la intensidad de lluvia (Fig. 5). Sin embargo, mientras Cambisol presentó una evolución más gradual que los anteriores, la variación de K en Gypsisoil fue casi nula.

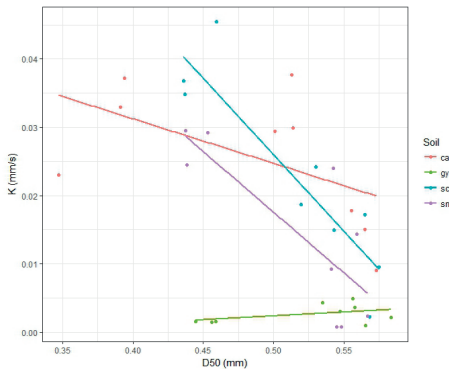


Fig. 5. Variación de la conductividad hidráulica en relación con el incremento en el tamaño mediano (D50, mm) de las gotas por simulación, siendo esta una medida indirecta de la costra y tipo de suelo.

El distinto comportamiento de cada suelo se puede relacionar con sus características físico-químicas. Los Cambisoles presentan una mayor estabilidad de los

agregados debido a la presencia de cationes de calcio y magnesio. Los valores de estos cationes en extracto de pasta saturada de muestras de Cambisol son de 29.9, 4.08 y 4.13 meq/L, para Calcio, Magnesio y Sodio, respectivamente. Estos cationes son atraídos a las arcillas y forman agregados estables, presentando una mayor resistencia al impacto y erosión de las gotas de lluvia y formación de costra. Los Gypsisoles son suelos con una textura limosa y muy bajo contenido de materia orgánica. La presencia de minerales de yeso junto con el bajo contenido en arcillas dificulta la agregación de las partículas (Beguiría et al., 2015) y reduce los valores de K (Moret-Fernández et al., 2013). Los elevados contenidos de sales de cloruro en Solonchak, y sodio en Solonetz se relacionan con una disminución en la porosidad. La presencia de sales intercambiables provoca la dispersión de las arcillas, disminuyendo la estabilidad estructural lo que se traduce en una disminución de la tasa de infiltración y conductividad hidráulica.

En general, se observó una correlación positiva entre la S y la intensidad de la lluvia.

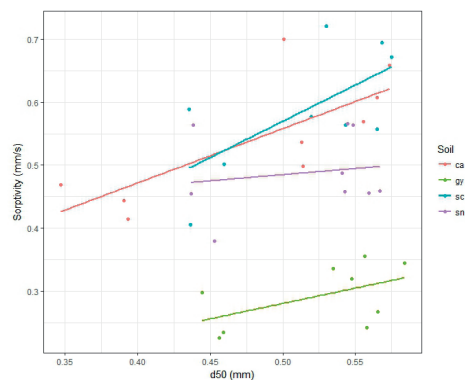


Fig. 6. Variación de la sorptividad en relación con el incremento en el tamaño mediano (D50, mm) de las gotas por simulación, siendo esta una medida indirecta de la costra y tipo de suelo.

Este comportamiento podría guardar relación con el efecto de la intensidad de la lluvia sobre el parámetro α de la curva de retención de Genuchten (1980)

$$\theta(h) = \theta_r + \left[(\theta_s - \theta_r) \frac{1}{(1 + |\alpha h|^n)^m} \right] \quad (1)$$

donde θ es la humedad volumétrica, θ_r y θ_s son la humedad residual y la saturación del suelo, h es el potencial matricial, α y n son los parámetros empíricos y $m = 1 - 1/n$. A su vez, S puede relacionarse con la curva de retención a través de la ecuación (Moret-Fernández y Latorre, 2017)

$$S^2 = \frac{(1-m)K_s}{cm(\theta_s - \theta_r)} \int_{\theta_r}^{\theta} [\theta_s + \theta - 2\theta_r] S_e^{1/2-n} \left[(1 - S_e^{1/n})^{-m} + (1 - S_e^{1/n}) - 2 \right] d\theta$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (2)$$

Si consideramos que a corto plazo la textura dentro de cada una de las parcelas experimentales es constante, al agrupar los parámetros de la Eq. (2) entre parámetros texturales y estructurales del suelo, obtenemos la siguiente simplificación

$$\alpha = \frac{K_s}{S^2(\theta_s - \theta_r)} f(n, \theta) \quad (3)$$

siendo

$$f(n, \theta) = \frac{(1-m)}{m} \int_{\theta_r}^{\theta} [\theta_s + \theta - 2\theta_r] S_e^{1/2-n} \left[(1 - S_e^{1/n})^{-m} + (1 - S_e^{1/n}) - 2 \right] d\theta \quad (4)$$

Así pues, si al aumentar la intensidad de lluvia se produce una disminución de K y un aumento S , según Eq.(4) se tiene que producir una disminución del valor de α . Este comportamiento tiene sentido físico ya que los valores de α tienden a disminuir en suelos más compactados (Moret-Fernández et al., 2016), lo cual concuerda con el incremento de la resistencia a la penetración con la intensidad de la lluvia (Fig.4). Estos resultados evidencian que la intensidad de la lluvia afecta también a los parámetros de la curva de retención de agua del suelo.

5. CONCLUSIONES

El presente trabajo ha permitido estudiar la relación entre la intensidad de la lluvia y la formación de costras estructurales y su efecto sobre los parámetros hidráulicos de los suelos. El diseño experimental ha permitido la monitorización de todas las variables involucradas en el estudio, permitiendo conocer limitaciones instrumentales, tales como el ángulo de la boquilla del simulador, que han influido en los resultados obtenidos. Este hecho sugiere que futuros ensayos con diferentes boquillas y mejoras en el simulador, podrían aportar resultados diferentes.

4. BIBLIOGRAFÍA

- Arnaez, J., Lasanta, T., Ruiz-Flaño, P., and Ortigosa, L. (2007). Factors affecting runoff and erosion under simulated rainfall in Mediterranean vineyards. *Soil and Tillage Research* 93, 324–334.
- Beguiría, S., Angulo-Martínez, M., Gaspar, L. and Navas, A. (2015). Detachment of soil organic carbon by rainfall splash: Experimental assessment on three agricultural soils of Spain. *Geoderma*, 245, 21-30

- FAO. (1993). Mapa mundial de suelos. Leyenda revisada: Informes sobre recursos mundiales de suelos, 60. Roma.
- Haverkamp, R., Parlange, J.Y., Starr, J.L., Schmitz, G., Fuentes, C. (1990). Infiltration under ponded conditions: 3. A predictive equation based on physical parameters. *Soil Science* 149, 292–300.
- Hudson, N.W. (1995). Soil Conservation. Third Edition. Batsford. London 304 pp.
- Latorre, B., Peña, C., Lassabatere, L., Angulo-Jaramillo, R., & Moret-Fernández, D. (2015). Estimate of soil hydraulic properties from disc infiltrometer three-dimensional infiltration curve. Numerical analysis and field application. *Journal of Hydrology*, 527, 1–12.
- López, M.V. (1993). Respuesta del suelo y de un cultivo de cebada al laboreo de conservación en agrosistemas de secano de Aragón. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias, Universidad de Navarra
- Moret-Fernández, D., Latorre, B. 2017. Estimate of the soil water retention curve from the sorptivity and β parameter calculated from an upward infiltration experiment. *Journal of Hydrology* <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.11.035>
- Moret-Fernández, D., Peña-Sancho, C., López, M.V. 2016. Influence of the wetting process on estimation of the water retention curve of tilled soils. *Soil Res.* <http://dx.doi.org/10.1071/SR15274>.
- Moret-Fernández, D. Castañeda, C., Pueyo, Y., Bueno, C.G., Herrero, J. 2013. Hydro-physical behavior of gypseous soils under different soil management in a semiarid region of NE Spain. *Arid Land Research and Management* 27, 1–16
- Morin, J., Benyamini, Y. & Michaeli, A. The effect of raindrop impact on the dynamics of soil surface crusting and water movement in the profile. *Journal of Hydrology* 52, 321–335 (1981).
- van Genuchten, M.T. 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal* 44, 892– 898.